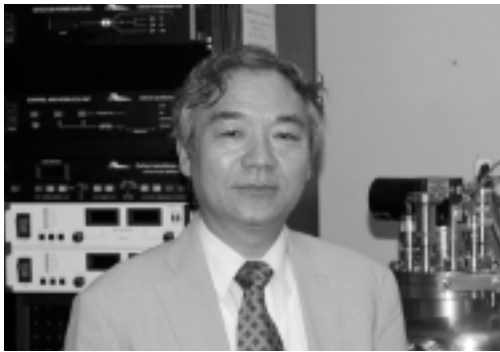




# 不思議なマイクロ組織の世界

## 里 達雄 研究室 ~ 材料工学専攻



里 達雄 教授

世の中の材料は大きく三種類に分けることができる。鉄や銅などの金属材料、プラスチックに代表される有機材料、そしてセラミックスを中心とする無機材料である。これら材料たちはそれぞれ長所・短所を持ち、必要に応じて使い分けられ互いに欠点を補い合っている。

里研究室ではそのうち金属材料、特にアルミニウムやマグネシウムといった軽金属の研究に取り組んでいる。今回はその中でも省エネ化、省資源化の観点から鉄の代替材料として期待されているアルミニウムの研究について紹介しよう。



### すべては組織制御のために

鉄が圧倒的なシェアを占める金属の世界だが、鉄の三分の一という軽さのために近年アルミニウムの需要が急激に高まっている。その使用は、電子通信機器、建物など幅広く、特に航空、輸送機器などの分野で効率化や省エネ化を進めるにあたり、鉄の代替材料として期待されている。しかし一般に金属は強度を高めると、延性や韌性(割れにくい性質)が低下するという問題があり、それらの両立は多くの研究者にとって長年の大きな課題となっている。このような背景を踏まえ、里研究室ではより優良なアルミニウムを開発しようと研究が進められている。

金属を実用的に使用するときには他の金属などを添加した合金として扱う場合が多く、アルミニウムにおいてもその例にもれない。先生は数あるアルミニウムの合金(アルミ合金)の中でも、アルミニウムにシリコンを添加した合金(Al-Si系合金)を研究材料として用いた。これは凝固温度が低く、流動性に優れているために casting (\*注1) 用として、たとえば、自動車部品などに多く実用

化されている。しかしさらに広い分野で使用することを考えると、今以上に延性、韌性を高める必要があった。

Al-Si系合金の延性や韌性といった性質は組織に大きく依存しており、性質を向上させるためには一般的に組織の制御を考える。この合金の組織はAlの結晶がその大部分を占めその間のわずかな空間にAlとSiの共晶(\*注2)が存在する。Alの結晶は樹枝状晶(デンドライト)とよばれ、その名の通り樹の枝のような形をしている。このような形をした結晶に力が加わると、力は結晶の一部に集中する。力をうまく分散させるには結晶をより丸くすればよいのだが、これまで多くの研究者がこの問題に取り組んでいるにもかかわらず、完全な球状にすることは難しかった。

この問題を解決するにあたり、先生は半溶融 casting という製法に着目した。半溶融とは、金属が融けて固体と液体の混ざった状態で、イメージとしてはシャーベットに近い。この状態のまま型に流し込む方法を半溶融 casting という。先生は、ま

\*注1 液体の金属を型に流し込み製造する方法

\*注2 一つの液体から二種類の固体が、ある一定の割合で同時に出現してできた混合物

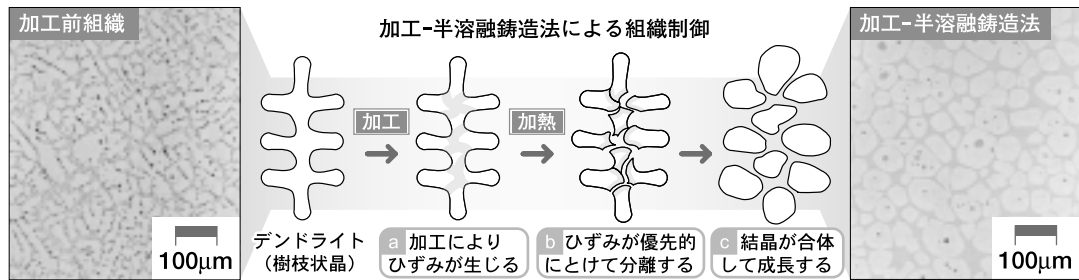


図1 加工-半溶融鑄造法によるデンドライトの球状化

ず加工処理を行い、その後熱を加えて半溶融状態にするという方法を行うことで図1のようにデンドライトを丸くすることに成功した。

デンドライトがなぜ丸くなるのか、その原理については次の通りである。前述の通り、デンドライトを持つ金属に力が加わると、力は結晶の一部分に集中しそこに多くのひずみが生じる(図1a)。こうしたデンドライトを半溶融の状態になるまで加熱すると、ひずみが多く入ったところから融けて崩れはじめる(図1b)。その後さらに加熱を続けると、デンドライトは細かく分離し、より安定な丸い結晶に変化する(図1c)。このとき、完全に溶解してしまうと加工の時に加えたひずみがなくなるため、凝固の時の結晶はこのように丸くならない。半溶融という状態であるからこそなした結果なのだ。

里先生は、力を加える量やそのときの温度をうまく調整することで、強度を落とすことなく、伸びを従来の十倍近くまで高めることができた。先生の製法は、半溶融鑄造法の前に加工を行うという意味で加工-半溶融鑄造法と呼ばれる。これま

で、鑄造法で作った金属はもろいというイメージがあったが、先生の製法で作られた合金はそのイメージを覆す結果を生み出したのである。

また、先生はこの製法がアルミニウムのリサイクルの際に利点を生み出すことを発見した。アルミニウムのリサイクル率が高いのは、リサイクル時に必要とするエネルギーが原料から生成するときの約3%で済むためである。しかし、それでも再生前と変わらない性質まで高めようとするとき大きなコストがかかってしまう。リサイクル利用される金属において、性質劣化の主な原因はその金属に含まれる不純物で、アルミ合金においても、もろくなる原因として鉄がよく問題となる。

アルミ合金に含まれる鉄の許容量は求められる用途によって異なるが、一般に全体の0.2%以上含まれているともろくて利用できないといわれている。ところが加工-半溶融鑄造法を用いると、許容限界の五倍にあたる1%含まれていてももろくならないことがわかった。このように許容量が向上した理由は処理前後の結晶形状を比較するとわかる。写真1はアルミニウムにシリコンと鉄を

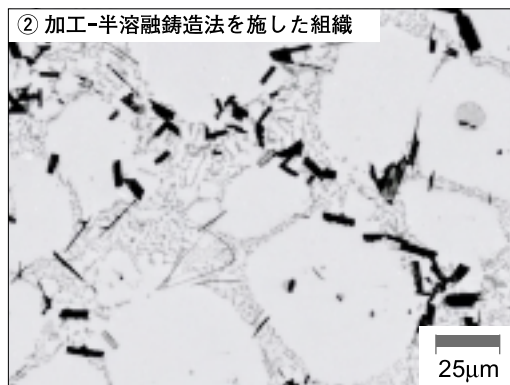
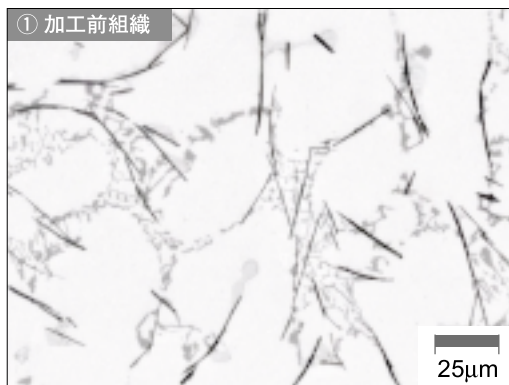


写真1 鉄含有時のアルミニウム組織の顕微鏡写真

添加したアルミ合金で、<sup>1</sup>が従来の方法で生成した場合、<sup>2</sup>が先生の方法で生成した場合の結晶の写真である。図中の黒い物質が鉄を主に含む化合物であり、この結晶が<sup>3</sup>のように針状だと亀裂が生じやすく延性が低下する。先生は加工-半溶融鑄造法でこの合金を生成すると、<sup>4</sup>のように結晶

が丸く小さくなり、延性の低下が起こりにくくなることを発見したのである。

このように、先生の考案する加工-半溶融鑄造法は延性、靱性を向上させてくれるだけでなく、リサイクルにおける不純物の問題も解消してくれる大変優れた方法なのである。

## 自動車の軽量化を目指して

地球温暖化の対策として二酸化炭素削減が叫ばれているが、日本では、自動車の排気ガスが排出量の約15%を占めている。これらを減らすために自動車の軽量化への要請が高まっている。そのため、軽い金属であるアルミニウムが近年注目を浴びており、すでにエンジン部品などには鉄に代わりアルミ合金が多く用いられている。

しかし、ボディパネルに用いる材料には、強度、延性、靱性、成形性、耐食性など多くの性質が要求されることから、アルミニウムの利用は多くない。たとえば、航空機などでよく用いられているジュラルミンは、強度は十分あるが、延性、靱性に乏しく衝撃吸収能力が低いなどの理由によりそれを自動車に利用するには難しかった。そこで、里研究室ではボディパネル材に使うことのできるアルミ合金の開発に力を注いでいる。

このようなアルミ合金として先生はアルミニウムにマグネシウムとシリコンを添加した合金(Al-Mg-Si系合金)に注目した。この合金は成形性や耐食性に優れ、さらに車に色を付ける焼付け塗装という工程において強度を自発的に向上させることができる。アルミニウム車の製造工程では加工した後に塗装するので、成形前は強度が低いため低エネルギーで加工でき、成形後に焼付け塗装により十分な強度を得る。そのため、工業的に非常に効率的で有利な合金なのである。

アルミニウム車の製造工程を述べる。まず焼付け塗装硬化を起こすための準備として、アルミニウム板材を550℃ほどで十分保持(溶体化という)して急冷(焼入れ)する。これは、高温でたくさんの溶質原子(Mg、Si)を主成分のAl中に溶かしてから急冷することで、室温で溶質原子を飽和量以上溶解することを目的としている。食塩水を想像してもらえば分かるように高温であるほど溶質は溶けやすく、それをゆっくり冷却すると再結晶

が起こる。しかし、ここでは分離する時間を与えず急冷したため飽和量以上の溶質原子が室温でAl中に存在するのである。その後、板材は室温で倉庫に保管され、プレス加工などにより部品を製造し、自動車の形に組み立てられる。そして最後の仕上げの焼付け塗装時に、焼入れて飽和量以上に溶け込んだ溶質原子が与えられた熱を利用してAl相中に異質相として析出する。この析出相が硬さ向上の原因であり、細かい析出物が多くあるほど、アルミ合金が塗装時に硬化する割合が高い(この割合を焼付け塗装硬化性、以下BH性という)。つまりBH性が高いと、強度の向上が大きくなる。

しかし、焼入れ後に室温放置する時間が長いと析出物はまばらになり、BH性が低くなってしまふ。このことは以前から観察されていたが、析出物に差が生じる理由はこれまでわかっていなかった。なぜなら、室温においた時のアルミニウム組織の変化は予想はされていたが、ナノスケールでの変化なので技術的に実際の観察が難しかったからである。里先生は最先端の三次元アトムプローブ法という原子個々の単位で原子の種類や集まりを調べられる方法を用いて、室温では数十個単位の原子が集まっていることを初めて確かめた。先生はこれを、原子がナノスケールで集まってクラスタ(集団)を形成していることからナノクラスタとよんでいる。

このナノクラスタについて様々な分析、特に三次元アトムプローブ法を行った結果から、このアルミ合金系では焼入れ後の保持温度によって、BH性を「高くするもの」、「低くするもの」の2種類のナノクラスタが存在することがわかった。その一方は焼入れ後室温に保持することで発生して、BH性を低下させるという意味で悪玉ともよべるクラスタである。この悪玉クラスタが出現す

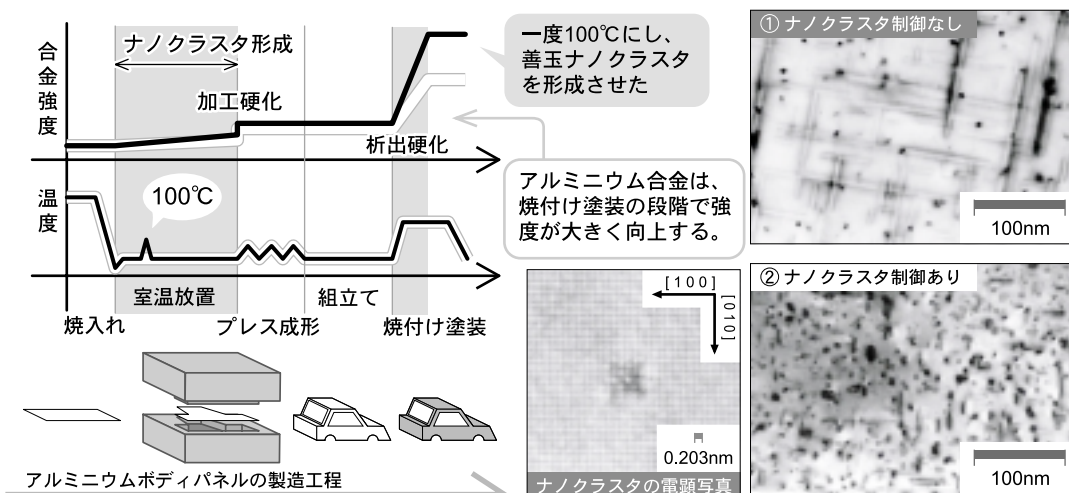


図2 アルミニウム自動車の製造工程とナノクラスタによる強度の変化

ると図2のように析出物がまばらになるため強度の上昇は小さくなる。もう一方のクラスタはBH性を高くする善玉とよべるクラスタであり、善玉クラスタは焼入れ後室温ではなく100℃前後で保持することにより出現することがわかったのである。この善玉クラスタが焼付け塗装前に存在すると図2の通り析出物が微細に多く出現するため強度は高くなる。つまり、BH性を大きくするには善玉クラスタを多く出現させれば良い。すでに先生は善玉クラスタのみが発生する方法を研究して、見つけ出している。それは図2グラフ黒線のように、焼入れ直後10分ほど100℃に保持するという方法であり、善玉クラスタが出現する温度範囲に少しの時間保持することで、それのもととなる核を多く形成させている。その後室温に戻しても核が残っているため善玉クラスタがそのまま成長し、BH性は高いものとなっている。これを利用すれば、倉庫で材料を長時間保持しても

BH性を低下させないで済むのである。この研究成果をもとにアルミニウム自動車の開発が活発になることが期待される。

優れた性質をもった金属をつくらうとすると、多くの人はず合金の組成を調整することを考えるだろう。確かに、組成を変化させることは有効な手段であるが、それだけでは本当に優れた性質を持つ金属は決して手に入らない。加工-半溶融-鋳造法や焼付け塗装を例に取るように、同じ組成の金属が私たちの目で見て違いが無くても光学顕微鏡や電子顕微鏡で見える組織が異なれば性質は全く別のものになる。つまり、優れた機能を持った金属を作りたければ、組織の制御を考え、それに至る処理プロセスを考えられることが重要なのである。このことは、合金を設計する上で基本となることであり、世界の先頭を走っている里先生もこの基本を出発点に様々なアイデアを盛り込み、研究を展開している。

今回の取材は自分の専門分野の研究であり、慣れ親しんできた金属研究の最先端を垣間見ることができたことは非常に幸運でした。また、今回文章を執筆した経験は私の今後の学究の大きな糧となることは間違いなく、金属工学の分野は日本が世界最先端の研究を行っていることを再認識せずにはいられませんでした。

里研究室では、他にもマグネシウムや銅などに

おいて、今回紹介した研究に劣らない素晴らしい研究をされていますが、紙幅の都合上紹介できずに本当に残念です。

最後になりましたが、編集にあたり里先生にはお忙しいところ幾度となく取材に応じていただきました。厚くお礼を申し上げますとともに先生の今後のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

(後藤 章仁)